

文章编号:1004-2539(2008)04-0054-03

## 一种测量转台位置精度的方法及误差分析

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042) 王国民

**摘要** 转台转动的位置误差测量有多种方法。不同的方法也有相应的测量仪器,但这些专业仪器价格比较昂贵。针对需要测量角度很小、转速很慢的转台特点,本文介绍了一种用直线代替圆弧来推算旋转角度的测量方法,并对各种影响测量精度的因素进行了分析。实验表明,这种方法简单、可靠、成本低。在 10 测量角度范围内,角度测量误差小于 1.13。在 30 测量角度范围内,角度测量误差小于 1.68。

**关键词** 转台 位置精度 小角度测量 角度测量误差

### 引言

对于各种传动系统,如齿轮传动、蜗轮蜗杆传动、摩擦传动等,其回转位置精度的测量相当重要。转台的位置精度测量,实质上就是角度测量及其角度测量精度。测量通常有两种方法,一种为直接测量法,另一种为间接测量法,直接测量法需要相应的高精度测量仪器。目前国内外已有各种测量仪器可以测量,如光电自准直仪与棱体配合测量<sup>[1-2]</sup>、高精度的旋转编码器<sup>[3]</sup>、小角度测量仪等。这些测量设备价格昂贵,精度在 1 左右的,价格一般在十多万人民币左右。本文用直线代替圆弧间接推算角度的方法对转台的位置精度进行测量,并对各种影响测量精度的因素进行了分析和计算。分析计算表明,在 0.5 测量角度范围内,角度测量误差小于 1.68。



图1 转台装置图

### 1 测量原理与系统组成

测量原理就是常用的三角测量法。待测量转台装置如图 1 所示。转台从动轮的直径是 1 000mm,加工一根高精度的 300mm × 40mm × 6mm 的玻璃平尺。把平尺沿从动轮的半径方向固定在从动轮的边缘上,以达到加长从动轮半径提高转角分辨率的目的。而后用固定架固定好千分表。千分表是瑞士 TESA 产品,千

分表测杆球头到旋转中心的距离是 780mm。千分表的格值是 1μm,这样千分表每走 1 格对应从动轮的旋转角度为 0.264 4。测量原理图如图 2。

### 2 测量误差分析

#### 2.1 直线运动代替圆弧运动引起的测量误差

由测量装置可知,千分表测量的是直线运动量,随着转台的转动,千分表测头

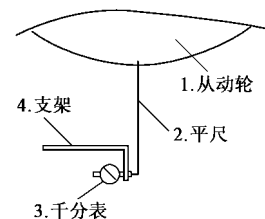


图2 测量原理图

在玻璃平尺上沿径向要作滑动,即千分表球头处的旋转半径发生了变化。测杆压缩时旋转半径增大,测杆外伸时旋转半径减小。因此,随着旋转运动的进行,千分表 1 格所对应的角度发生了变化,且这种变化不断的积累。此处以变小为例,当千分表显示格数为  $n$  时,计算角度  $n \times 0.2644$  与实际角度的差为

$$= n \times \arcsin\left(\frac{m}{\sqrt{m^2 + l^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{nm}{\sqrt{(nm)^2 + l^2}}\right) \quad (1)$$

式中,  $m$  为千分表格值;  $l$  为测点旋转半径;  $n$  为千分表格数。

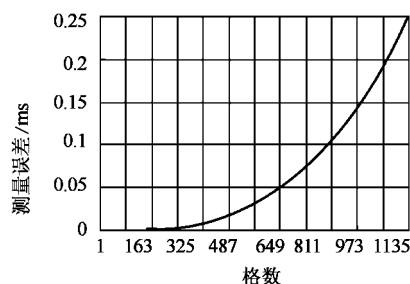


图3 转动角度与角度误差关系图

根据式(1)可作出转动角度(千分表格数)与角度测量误差的关系曲线。如图 3 所示。随着测量角度(千分表格数)的增大,角度测量误差快速增加。测量

角度为 10 时,角度测量误差仅为  $(1.693 \times 10^{-3})$ , 测量角度为 30 时,角度测量误差为 0.046, 当测量角度为 1 的时候,角度测量误差达到了 0.365 7。

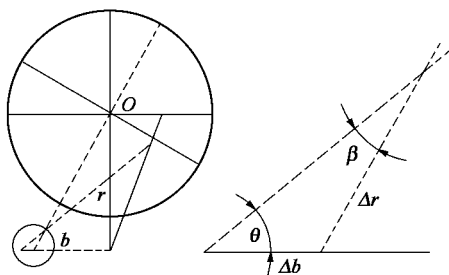


图4 平尺不过中心计算简图

## 2.2 测杆头到旋转中心的距离误差引起的测量误差

千分表测杆球头到旋转中心的距离误差也会带来角度测量误差。但这一误差在整个测量过程中不会发生变化。测杆头是  $\phi 3\text{mm}$  的球头。用毫米级的直尺测量距离,精度可在 0.5mm 以内。经过计算,由此产生的误差仅为  $(1.69 \times 10^{-4})$ 。这一误差在一般测量中可以忽略不计。

## 2.3 平尺偏心引起的测量误差

加长玻璃平尺的测量面应该通过旋转中心。但实际安装会有一定的误差。安装方法:先用直径 1mm 的钢针针尖通过自准直仪找到旋转中心,用拉线的办法保证平尺通过旋转中心,这一过程总的线性误差在 1mm 以内。下面对由这一误差引起的角度测量误差进行计算。计算简图如图 4。图中各参数定义如下:

$r$ :旋转半径  $a$ :线性偏心误差

$b$ :千分表的值。图 4 的右图是局部放大图。

则

$$= \arctan\left(\frac{a}{r}\right) \quad (2)$$

$$r = \sqrt{r^2 + b^2} - r \quad (3)$$

$$= \arctan\left(\frac{r}{b}\right) - \quad (4)$$

则在放大的三角形中,根据正弦定理有

$$\frac{r}{\sin(\quad)} = \frac{b}{\sin(\quad)}, \quad b = \frac{r}{\sin(\quad)} \sin(\quad) \quad (5)$$

$$= \arctan\left(\frac{b+b}{r}\right) - \arctan\left(\frac{b}{r}\right) \quad (6)$$

根据计算式(6),可作出偏差在 1mm 的情况下,测量角度值(千分表格数)与角度测量误差的关系曲线。如图 5 所示。从图中可以看出,角度测量误差随测量角度的增加而增大。而且增大的幅度较大。测量角度为 10 时,角度测量误差为 0.065 8;测量角度为 30 时,角度测量误差为 0.579 6;当测量角度为 1 的时候,角度测量误差达到了 2.798 2。

## 2.4 千分表引起的测量误差

千分表本身在测量过程中也有误差。如图 2 所示,转台测量采用的是瑞士 TESA YR 千分表,此千分表重复精度和回程误差均为  $1\mu\text{m}$ , 全量程精度为  $4\mu\text{m}$ 。转台在测量过程中是单方向旋转,因此,千分表传动链的间隙被压在一边,回程误差对测量精度没有影响。如果按满量程来计算,由千分表本身精度产生的角度测量误差为 1.06。但通常情况下,采用这种方法测量是用不到全量程的。

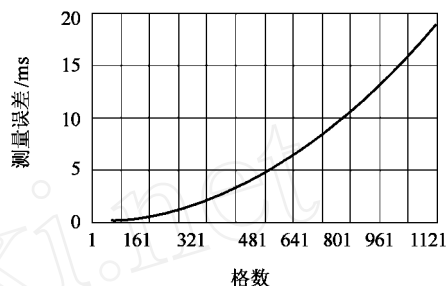


图5 转动角度与角度误差关系图

## 2.5 测量误差综合

根据以上分析,将以上 4 种角度测量误差几何相加即得总的角度测量误差与被测角度之间的关系,如表 1 所示。

表1 转动角度与角度测量误差关系表

角度值/(°)	5	10	15	20	25	30
角度误差/(°)	1.077 2	1.127 7	1.211 6	1.330 5	1.487 1	1.685 7
角度值/(°)	35	40	45	50	55	60
角度误差/(°)	1.931 2	2.231 8	2.596 7	3.038 3	3.573 3	4.224 1

根据表 1 并根据转角测量的精度要求,就可以确定采用这种测量方法所能测量的转动角度范围了。如测量精度要求在 1 左右,则被测转角应在 5 以内。测量精度要求在 2 左右,则被测转角在 35 以内。

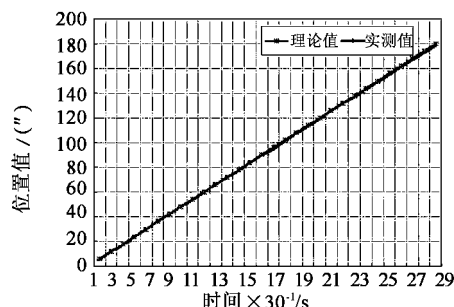


图6 转台理论位置曲线和实测位置曲线关系力图

## 3 实测结果及分析

在图 1 所示的试验转台上,采用这种方法进行了

实际测量。运行的速度为  $0.2/s$ , 以运行时间间隔 30 秒为采样点, 即对应的测量角度为  $6^\circ$ , 得出转台的理论位置曲线和实际位置曲线, 如图 6 所示。由于千分表的量程有限和实际操作条件的限制, 共实测了 30 组数据, 总共 15 分钟。分别测量 3 次, 取各自的平均值作为实际值。

图 6 中的曲线, 验证了前面分析所得出的两点结论, 随着测量角度的增大, 角度测量误差相应的增大; 在小角度测量时有着很高的精度。试验中测量的角度为  $3^\circ$ , 测量精度为  $1.057^\circ$ 。如把千分表换成量程更大、精度更高的长度计, 德国 Heidenhain 公司有这种产品, 如 MT12, 量程为  $12\text{mm}$ , 精度为  $\pm 0.2\mu\text{m}$ 。则这种测量方法优点更加突出。一是量程增大了, 可以测量更大的转角; 二是从上面的分析可知, 千分表的测量精度 ( $4\mu\text{m}$ ) 引起的角度误差占了很大的比例, 如果换成测

量精度更高的长度计, 则这一项误差会降很多。总之, 采用这种测量方法, 再配上大行程、高精度的长度计, 在  $0.5^\circ$  的测角范围内, 角度测量精度能到  $1^\circ$  左右。在经费有限的情况下, 对小角度测量有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 任顺清, 马广程, 伊国兴, 等. 测量角位置误差时自准直仪读数与正多面体偏差的符号取定[J]. 计量技术, 2003(12): 42 - 45.
- [2] 蔡宗平, 王跃钢, 许化龙. 高精度低速回转台自动化检定方法与实现[J]. 航空计测技术, 1998, 18(4): 10 - 11.
- [3] 刘文魁, 石建玲. 光电旋转编码器在角度测量中的应用[J]. 现代制造工艺, 2006(11): 90 - 91.

收稿日期: 20070927 收修改稿日期: 20071029

基金资助: 国家自然科学基金资助项目 (10778630)

作者简介: 王国民 (1967 - ), 男, 江苏海安人, 高级工程师, 博士

(上接第 47 页)

Simulink 仿真生成结果, 计算约束条件。得出 E 点坐标值在 iSIGHT 的 Calculation 中计算目标函数, 这样可以加快求解。

### 2.5 优化结果

采用 iSIGHT 中提供的自适应模拟退火 (Adaptive Simulated Annealing) 算法对模型进行优化, 优化结果列于表 1, 目标函数的迭代曲线如图 7 所示。

表 1 优化结果

变量	初值	优化值
$A_x$	25	21.4208
$A_y$	25	21.2899
$D_z$	175	174.5106
$D_y$	225	231.6546
$L_{AB}$	115	103.5033
$L_{BC}$	175	187.3029
$L_{CD}$	225	219.4422
$L_{BE}$	275	299.8194
$L_{CE}$	325	331.1106
$F(x)$	645.9381	29.1794

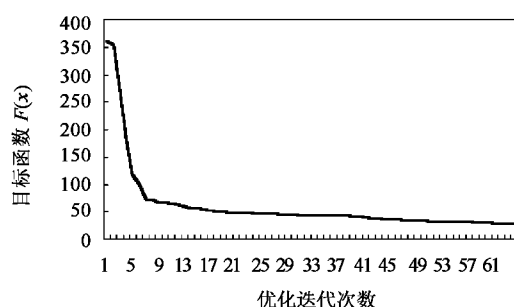


图 7 目标函数迭代曲线

## 3 结论

应用 MATLAB/SIMULINK 中的 SimMechanics 模块对平面四连杆机构建模, 并进行了仿真分析。同时, 应用 iSIGHT 对机构连杆上一点的轨迹进行优化。得到以下结论: (1) 使用 SimMechanics 可以简单方便地对四连杆机构建模, 解决机构系统的仿真问题; (2) 应用 iSIGHT 对连杆机构进行轨迹优化, 方便地得到满足设计要求的机构参数。iSIGHT 结合 SimMechanics 软件是进行机构优化设计的方便、有效途径。

可以进一步对模型进行动力分析、精度分析等, 同时结合 iSIGHT 进行优化, 得到满足要求的机构。

### 参 考 文 献

- [1] 郑宏伟, 李平康. 基于 SimMechanics 的四杆机构仿真技术研究[J]. 机电工程技术, 2005, 34(5): 62 - 65.
- [2] 孙桓, 陈作模主编. 机械原理 (第五版) [M]. 高等教育出版社, 1995: 149 - 152.
- [3] 曹惟庆. 连杆机构的分析和综合 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2002: 24 - 35.
- [4] 华大年, 华志宏, 吕静平. 连杆机构设计 [M]. 上海: 上海科技出版社, 1995: 25 - 35.
- [5] 刘军. 平面多杆停歇机构优化设计研究[D]. 西安电子科技大学, 2007: 13 - 18.
- [6] 吴觉士, 仲梁维. 基于 MATLAB - SimMechanics 的四缸内燃机曲柄连杆机构仿真和动力学分析[J]. 机械传动, 200, 31(1): 34 - 36.

收稿日期: 20070830

作者简介: 庞和喜 (1982 - ), 河北唐山人, 硕士研究生

kinematical performance are better than the original that.

**Key words:** Step - search method Multiple - linkage mechanism  
Drawing performance

#### **The Motion Simulation and Optimization of Four - bar Mechanism based on SimMechanics and iSIGHT** .....

..... Pang Hexi , Cao Hongjun(46)

**Abstract** An approach of implementing dimensional optimization for mechanisms by using the software of iSIGHT combined with Matlab/Simulink was presented. The kinetic model of the mechanism was established using SimMechanics within MATLAB/SIMULINK. The optimization model was established in iSIGHT. The Simulink model was called automatically by iSIGHT during optimization process. As an example, the optimization of the path generation problem for 4 - bar mechanism was implemented by this method. The computing results show that this method is effective and convenient for implementing mechanism optimizations.

**Key words:** Planar four - bar mechanism Dimensional optimization  
Sim Mechanics iSIGHT

#### **The Choice of Gear Modification Coefficient by Using Sense - reversing Method** .....

..... Zhao Zhenjiang(48)

**Abstract** A new kind of method for the choice of gear modification coefficients is presented. Its main idea is regard gear modification coefficient as a known parameter. The method take full advantage of a computer's features of quick operation and accurate calculation and judgement function. A computer can find modification coefficients from a lots of modification coefficients which meet the needs of given condition, in the same time user needs input all kinds of given parameters and limited conditions only.

**Key Words:** Gear Modification coefficient VB Sense - reversing method

#### **Measurement Method and Accuracy Analysis of a Turntable Position** .....

..... Wang Guomin(54)

**Abstract** There are some ways to measure the turntable rotation position. Different ways have different apparatus to finish the measurement, but, the price of these professional apparatus are very high, it is impossible for a small research team to buy them. So, a simple and special method, measuring linear distance instead of arc distance to calculate the rotation angle, is proposed aim at the small measurement angle and low rotation velocity. Meanwhile, the factors, which affect the measurement accuracy, are also probed. Experiment shows that this method is simple, reliable and low cost. The angle position error is less than 1.13 under the 10 angle range and less than 1.68 under 0.5° angle range.

**Key words:** Turntable Position accuracy Small angle measure  
Angle measure error

#### **The Effect of Manufacture Error on Roller Failure for Overdrive Clutch** .....

..... Xie Mingjun , Chen Guoding(57)

**Abstract** The uneven distribution phenomenon of the roller contact stress is studied, when the roller overdrive clutch, under the condition of the largest torque 2500N·m, has the parallel errors of the distance ring notches side and the inner cam roller working surface with the axis (namely nose stress concentration). Through the analysis of different errors influencing the roller contact stress distribution, it can provide the important value basis for controlling the errors of the overdrive clutch manufacture and the assembly process.

**Key words:** Overdrive clutch Roller Parallel error Error analysis

#### **The Application of Expansive Characteristic Diagram to the Analysis of Planetary Differential** .....

..... Gui Naipan , Luo Youxin , He Zheming(60)

**Abstract** It is introduced how the graduation of expansive characteristic diagram of planetary differential, J characteristic diagram, classification diagram of power flow and equality efficiency chart are expressed in the expansive characteristic diagram. And an example is applied as the analysis in close planetary transmission of power difference. By characteristic diagram, various design projects can be easily compared.

**Key words:** Planetary differential Expansive characteristic diagram  
J characteristic diagram Power flow Efficiency

#### **Method of Gear Fault Diagnosis based on Time Series Analysis and RBF Neural Networks** .....

..... Li Li , Jiang Yu , Li Zhixiong(63)

**Abstract** Due to incipient fault features of gear being not obvious, a method based on time series analysis and radial basis function neural networks is proposed. First the vibratory signals in normal and fault states have been analyzed by time series analysis respectively, so state features can be extracted effectively by the time series model's autoregressive coefficients. Then the autoregressive coefficients make up the eigenvectors which are taken as inputs for neural networks training. Consequently the identification and diagnosis of gears in different working conditions, such as normal, crack, gear tooth broken, and partial pitting etc. have been accomplished. The diagnosis result shows that the method based on time series analysis and RBF neural network is feasible for multiple or early fault classification.

**Key words:** Gear faults Diagnosis Time series analysis Feature extraction RBF Neural networks

#### **A Gear Faults Diagnosis Method based on Bispectrum** .....

..... Wu Xiaoming , Zhu Linghong(67)

**Abstract** A gear faults diagnosis method based on bispectrum is put forward. Firstly, non - linear characteristic signals of gear is got, gauss background signals is eliminated making use of bispectrum character.